

多级检修模式下电网计划检修周期协调优化

赵 渊,张 煦,王 洁,范 飞,耿 莲

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘要: 基于有效役龄和故障率函数对电力设备的多级检修方式进行建模,并从可靠性成本/效益角度对发输电系统多级计划检修周期进行协调优化研究。计及故障率随时间的增长效应,以电力设备检修导则中的计划检修等级定义为参照,建立考虑 A 级完全检修、C 级不完全检修条件下的电力设备故障率模型;在此基础上建立系统可靠性指标、系统检修成本、停电成本、C 级计划检修周期、A/C 级检修周期比率之间的解析表达式。针对以系统检修成本与系统停电成本之和最小为目标的大规模混合整数非线性规划问题,提出融合灵敏度分析和前向/后向差分思想的电网多级计划检修协调优化启发式迭代算法。探讨检修恢复因子变化对电网计划检修优化的影响。RBTS、IEEE-RTS79 系统验证了所提算法的有效性。

关键词: 不完全检修方式; 计划检修; 检修周期; 模型; 灵敏度; 差分; 优化; 检修; 可靠性; 成本

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.011

1 电力设备计划检修模型

电力设备故障率变化在整个寿命周期内呈浴盆曲线特性^[1-2]。传统文献认为,电力设备在稳定运行期的故障率恒定,但实际上受零部件老化、磨损和隐藏故障等因素影响,故障率随时间呈升高趋势^[3-4],进而导致系统风险不断攀升。计划检修是延缓设备劣化过程、降低故障检修成本、使系统恢复到一定可靠性水平的有效措施和重要手段。

就计划检修模型而言,通常假设设备经计划检修后以一定概率“修复如新”或“修复如旧”,两者的概率之和为 1^[5],对应检修方式分别称为完全检修和最小检修方式。但实际检修恢复效果与检修强度有关,往往介于“修复如新”和“修复如旧”之间,称该方式为不完全检修^[6-7]。目前,基于不完全计划检修建模可分为 3 类:基于设备有效役龄模型^[8],该模型便于快速计算检修后瞬时故障率函数值;基于故障率函数模型^[9-10],该模型便于反映检修对故障率增长速率的影响;混合模型^[11-12],该模型综合了上述 2 类模型的优点,因而被广泛应用于计划检修决策研究中。3 种模型如图 1 所示,其中 $\lambda^{(k)}(t)$ 为第 $k-1$ 至 k 次计划检修间的故障率函数, $a^{(k)}$ 、 $b^{(k)}$ 分别为第 k 次计划检修对故障率和有效役龄影响因子, T 为计划检

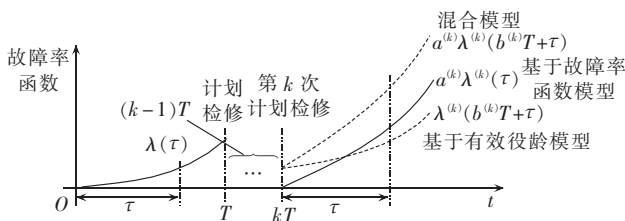


图 1 不完全计划检修模型示意图

Fig.1 Schematic diagram of imperfect preventive maintenance model

修周期。

电力设备检修导则^[13-15]将计划检修划分为 A、B、C、D 4 个等级,其中 A 级检修对设备进行全面解体检查和修理,检修最为彻底,但周期最长,一般为 4~6 a;B 级检修针对设备存在的问题,对其部分部件进行解体检查和修理,周期为 2~3 a;C 级检修根据设备的磨损、老化规律,有重点地对其进行检查、修理和少量零件的更换等,通常每年检修 1 次;D 级检修是在设备总体运行良好的情况下,对其附属系统进行消缺检修。由于导则中各级检修周期相对固定,未考虑设备类型、容量、自身可靠性变化规律以及设备在电网拓扑中的位置等因素,极易导致“过检修”或“欠检修”现象。考虑到 C 级检修为目前电网进行的年度性常规检修,对系统可靠性影响显著,而 A 级检修最为全面和彻底,显著影响系统经济性,因此选取 A、C 2 个重要检修等级,并计入设备故障率变化规律及网络拓扑等因素,从系统层面开展多级检修模式下电网计划检修周期协调优化。

电力设备进行一定次数 C 级检修后会施行 A 级检修,设 A/C 级检修周期比率为 N (整数),则电网 A/C 级计划检修周期优化问题变为包含 C 级检修周期和 N 的混合整数非线性规划(MINLP)问题。目前求解 MINLP 通常采用动态规划、遗传算法等方法,但这些方法均存在计算量大、效率低等问题。本文考

收稿日期:2014-04-18;修回日期:2015-03-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50977094);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(CDJZR11150012);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2011BB6047);输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512711208)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(50977094),the Fundamental Research Funds for the Central Universities(CDJZR11150012),Natural Science Foundation of Chongqing(CSTC2011BB6047) and State Key Laboratory Research of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(2007DA10512711208)

虑到灵敏度指标能够反映连续型决策变量在给定值附近微小调整对决策目标的影响大小,而差分指标能够反映调节整型决策变量对决策目标的影响程度,基于此,提出融合灵敏度和差分思想的电网多级计划检修协调优化启发式迭代算法。最后,针对 RBTS 和 IEEE-RTS79 系统开展 A/C 级计划检修协调优化研究,并探讨 C 级检修恢复因子变化对 A/C 级计划检修优化的影响规律。

2 计及多级检修的故障率模型

受老化、磨损等因素影响,电力设备故障率随时间呈升高趋势,部分文献对故障率增长效应进行了描述,如文献[2,16]采用阶跃函数,文献[17]采用指数分布函数,文献[18]采用威布尔函数来描述老化等因素对故障率的影响规律。本文采用 $\beta_1=1$ 的二重威布尔函数^[19]描述电力设备随时间的增长效应,如式(1)所示,其中 $\alpha_i \geq 0, \beta_i \geq 0 (i=1,2)$ 为 i 重威布尔分布的尺度参数和形状参数。

$$\lambda(t) = \alpha_1 \beta_1 t^{\beta_1-1} + \alpha_2 \beta_2 t^{\beta_2-1} \quad (1)$$

本文视 C 级检修为不完全检修方式, A 级检修为使设备“恢复如新”的完全检修方式,事后检修为使设备“修复如旧”的最小检修方式,则 A/C 级计划检修下设备故障率曲线如图 2 所示。

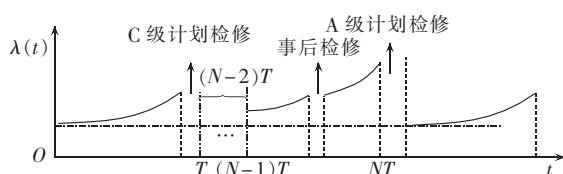


图 2 A/C 级计划检修方式下设备故障率曲线

Fig.2 Curve of device failure rate in A/C-level preventive maintenance mode

假设电力设备 A/C 级检修周期比率为 N , 即每进行 $N-1$ 次 C 级检修后进行 1 次 A 级检修。设电力设备 C 级检修周期为 T , 第 i 次 C 级检修前的有效役龄为 $y^{(i)}$, 第 $i-1$ 至 i 次 C 级检修间的故障率函数为 $\lambda^{(i)}(t)$, 故障率恢复因子为 $a^{(i-1)}$, 役龄回退因子为 $b^{(i-1)}$, $a^{(i-1)}$ 和 $b^{(i-1)}$ 受设备 C 级检修次数等因素影响, 随着检修次数的增大, 改善效果逐渐变差, 即: $1=a^{(0)} \leq a^{(1)} \leq \dots \leq a^{(N-1)}, 0=b^{(0)} \leq b^{(1)} \leq \dots \leq b^{(N-1)} \leq 1$ 。则有:

$$y^{(i)} = b^{(i-1)} y^{(i-1)} + T = \dots = T + b^{(i-1)} T + \dots + (b^{(i-1)} \dots b^{(2)} b^{(1)}) T = B^{(i)} T \quad (2)$$

$$\lambda^{(i)}(t) = a^{(i-1)} \lambda^{(i-1)}(b^{(i-1)} y^{(i-1)} + t) = (a^{(i-1)} a^{(i-2)} \dots a^{(0)}) \times \lambda(B^{(i)} T + t) = A^{(i)} \lambda(B^{(i)} T + t) \quad (3)$$

$$\begin{cases} A^{(i)} = \prod_{j=0}^{i-1} a^{(j)} \\ B^{(i)} = \prod_{j=1}^{i-1} b^{(j)} \end{cases}$$

其中, $i=1,2,\dots,N$ 。

式(3)建立了元件故障率函数与 C 级检修周期

和 A/C 级检修周期比率 N 的函数关系。

3 计及多级检修的系统可靠性、经济性指标

由第 2 节可知, 元件每进行 $N-1$ 次 C 级检修后进行 1 次 A 级检修, 则元件 A 级检修周期内平均停电时间 T_D 为:

$$T_D = r_{pA}'' + (N-1)r_{pC}'' + r \sum_{i=1}^N \int_0^T \lambda^{(i)}(t) dt \quad (4)$$

其中, r_{pA}'' 为平均 A 级计划检修时间; r_{pC}'' 为平均 C 级计划检修时间; r 为平均事后检修时间。 $T, T_D, r_{pA}'', r_{pC}'', r$ 的单位均为 h, $\lambda^{(i)}(t)$ 单位为次/h。

根据平均无效度概念, 其定义为给定时间 T_T 内平均不可用时间 T_D 与 T_T 的比值, 结合式(2)、(3), 可得元件平均无效度 U 为:

$$U = \frac{T_D}{T_T} = \frac{r_{pA}'' + (N-1)r_{pC}'' + r \sum_{i=1}^N \int_0^T A^{(i)} \lambda(B^{(i)} T + t) dt}{NT} \quad (5)$$

设 M 个元件组成的系统, 元件状态相互独立, 分别为 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_M, S_k=0$ 表示元件 k 处于正常状态, $S_k=1$ 表示其处于故障状态, 则该系统状态 x 的概率可表示为:

$$P(x) = P(S_1)P(S_2)P(S_3) \dots P(S_M) \quad (6)$$

则多级检修模式下系统可靠性指标: 系统失负荷概率 δ_{LOLP} 、电量不足期望 δ_{EENS} 的解析表达式分别如式(7)、(8)所示。

$$\begin{aligned} \delta_{LOLP} &= \sum_{x \in X} I_f(x) P(x) = \sum_{x \in X} I_f(x) \prod_{k=1}^M P(S_k) = \\ &= \sum_{x \in X} I_f(x) \prod_{k=1}^M [S_k U_k + (1-S_k)(1-U_k)] = \sum_{x \in X} \left\{ I_f(x) \times \right. \\ &\quad \left. \prod_{k=1}^M \left[S_k \left[r_{pAk}'' + (N_k-1)r_{pCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \right] \div \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (N_k T_k) + (1-S_k) \left[1 - \left[r_{pAk}'' + (N_k-1)r_{pCk}'' + \right. \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \right] / (N_k T_k) \right] \right\} \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_{EENS} &= 8760 \sum_{x \in X} I_f(x) P(x) L_C(x) = 8760 \sum_{x \in X} \left[I_f(x) L_C(x) \times \right. \\ &\quad \left. \prod_{k=1}^M P(S_k) \right] = 8760 \sum_{x \in X} \left\{ I_f(x) L_C(x) \times \right. \\ &\quad \left. \prod_{k=1}^M [S_k U_k + (1-S_k)(1-U_k)] \right\} = 8760 \sum_{x \in X} \left\{ I_f(x) L_C(x) \times \right. \\ &\quad \left. \prod_{k=1}^M \left[S_k \left[r_{pAk}'' + (N_k-1)r_{pCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \right] \div \right. \right. \\ &\quad \left. \left. (N_k T_k) + (1-S_k) \left[1 - \left[r_{pAk}'' + (N_k-1)r_{pCk}'' + \right. \right. \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \left. r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \right] / (N_k T_k) \right] \right\} \quad (8) \end{aligned}$$

其中, U_k 为元件 k 的平均无效度; X 为系统状态集合; $I_f(x)=0$ 表示系统正常状态, $I_f(x)=1$ 表示系统故障状态; $L_C(x)$ 为系统故障状态 x 下为使系统恢复到静态安全运行所需要的最小削负荷量。

系统总成本包括检修成本和停电成本, 设单位

停电成本为 C_L (万元/(MW·h)), 则系统停电成本 C_{loss} 可表示为:

$$C_{loss} = C_L \delta_{EENS} = 8760 C_L \sum_{x \in X} \left\{ I_t(x) L_C(x) \times \prod_{k=1}^M \left[S_k \left[r_{pAk}'' + (N_k - 1) r_{pCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \right] \div \right. \right. \\ \left. \left. (N_k T_k) + (1 - S_k) \left[1 - \left[r_{pAk}'' + (N_k - 1) r_{pCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \right] / (N_k T_k) \right] \right\} \right\} \quad (9)$$

检修成本包括两部分,即检修材料费和施工费。设单位施工费为 C_W (万元/h); 1 a 内元件 k ($k=1, 2, \dots, M$) 的期望事后检修次数为 N_{Ck} , 单次事后检修成本为 C_{Ck} , 其中事后检修材料费 C_{CMk} ; A 级检修次数为 N_{pAk} , 单次 A 级检修成本为 C_{pAk} , 其中 A 级检修材料费为 C_{pAMk} ; C 级检修次数为 N_{pCk} , 单次 C 级检修成本为 C_{pCk} , C 级检修材料费为 C_{pCMk} ; 单位停电成本为 C_L (万元/(MW·h)), 系统总成本为 C_{total} 。则有:

$$\begin{cases} C_{pAk} = C_{pAMk} + C_W r_{pAk}'' \\ C_{pCk} = C_{pCMk} + C_W r_{pCk}'' \\ C_{Ck} = C_{CMk} + C_M r_k \end{cases} \quad (10)$$

设备计划检修成本包括 1 次 A 级检修、 $N-1$ 次 C 级检修, 故系统 A 级检修成本 C_{plan}^A 、C 级检修成本 C_{plan}^C 、系统总检修成本 C_{plan} 表示为:

$$C_{plan}^A = \sum_{k=1}^M (C_{pAk} N_{pAk}) = 8760 \sum_{k=1}^M \frac{C_{pAk}}{N_k T_k} \quad (11)$$

$$C_{plan}^C = \sum_{k=1}^M (C_{pCk} N_{pCk}) = 8760 \sum_{k=1}^M \frac{C_{pCk} (N_k - 1)}{N_k T_k} \quad (12)$$

$$C_{plan} = C_{plan}^A + C_{plan}^C = 8760 \sum_{k=1}^M \left[\frac{C_{pAk}}{N_k T_k} + \frac{C_{pCk} (N_k - 1)}{N_k T_k} \right] \quad (13)$$

系统事后检修成本 C_{cor} 为:

$$C_{cor} = \sum_{k=1}^M C_{Ck} N_{Ck} = \sum_{k=1}^M \frac{8760 C_{Ck}}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \quad (14)$$

综上可得系统总成本 C_{total} 为:

$$C_{total} = C_{loss} + C_{plan} + C_{cor} = 8760 C_L \sum_{x \in X} \left\{ I_t(x) L_C(x) \times \prod_{k=1}^M \left[S_k \left[r_{pAk}'' + (N_k - 1) r_{pCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \right] \div \right. \right. \\ \left. \left. (N_k T_k) + (1 - S_k) \left[1 - \left[r_{pAk}'' + (N_k - 1) r_{pCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \right] / (N_k T_k) \right] \right\} \right\} + \\ 8760 \sum_{k=1}^M \left[\frac{C_{pAk}}{N_k T_k} + \frac{C_{pCk} (N_k - 1)}{N_k T_k} \right] + \\ \sum_{k=1}^M \frac{8760 C_{Ck}}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \quad (15)$$

4 基于灵敏度和差分思想的电网多级计划检修优化启发式迭代算法

4.1 基本思想

鉴于灵敏度指标能够反映出连续型决策变量在

给定值附近微小变化对决策目标的影响大小, 而差分指标反映的是调整离散型决策变量对决策目标的影响程度, 本文分别推导了系统总成本相对于 C 级计划检修周期的灵敏度公式和系统总成本相对于 A/C 级检修周期比率 N 的前向/后向差分公式, 以分别反映各元件 C 级计划检修周期调整、A/C 级检修周期比率 N 调整对系统总成本的影响大小, 从而指示 2 类决策变量的最优调整方向, 最终寻求两者的协调优化。

设系统总成本相对于各元件 C 级计划检修周期灵敏度为 $\beta_{sc} = (\beta_{sc1}, \beta_{sc2}, \dots, \beta_{scM})$, 系统总成本相对于各元件 A/C 级检修周期比率 N 的前向差分 $\Delta D_e = (\Delta D_{e1}, \Delta D_{e2}, \dots, \Delta D_{eM})$ 和后向差分 $\nabla D_e = (\nabla D_{e1}, \nabla D_{e2}, \dots, \nabla D_{eM})$ 。其中灵敏度指标正值/负值最大分别表示缩短/延长对应元件 C 级计划检修周期对降低系统总成本最有效, 从而确定了 C 级计划检修周期的最优调整方向。前向差分 ΔD_e 、后向差分 ∇D_e 分别反映的是各元件增大或降低 A/C 级检修周期比率 N 对系统总成本的影响。有以下几种情况:

① 当 $\Delta D_{ei} > 0, \nabla D_{ei} > 0$ 时, 表示增大元件 i 的 A/C 级检修周期比率 N_i 会增大系统总成本;

② 当 $\Delta D_{ei} < 0, \nabla D_{ei} < 0$ 时, 表示增大元件 i 的 A/C 级检修周期比率 N_i 会降低系统总成本;

③ 当 $\Delta D_{ei} > 0, \nabla D_{ei} < 0$ 时, 表示增大或降低元件 i 的 A/C 级检修周期比率 N_i 都会增大系统总成本, 这种情况表明 N_i 是给定情形下元件 i 的最优 A/C 级检修周期比率;

④ 当 $\Delta D_{ei} < 0, \nabla D_{ei} > 0$ 时, 这种情况不存在, 原因在于系统总成本是关于元件 A/C 级检修周期比率 N_i 的凹函数。

由于情况④不存在, 情况③本身处于最优状态, 因此只需考虑情况①和②下的 A/C 级检修周期比率调整方式。对于情况①, 寻找 ∇D_e 中的最大值, 降低对应元件 A/C 级检修周期比率对减小系统总成本最有效; 对于情况②, 寻找 ΔD_e 中的最小值, 增大对应元件 A/C 级检修周期比率对降低系统总成本最有效。

通过上述灵敏度和差分方式探寻 C 级计划检修周期和 A/C 级检修周期比率 N 的最优调整方向, 能有效确保每次迭代过程的最优搜索方向, 最终实现 2 类决策变量的快速协调优化, 如图 3 所示。

4.2 计及多级检修的灵敏度公式

元件状态概率相对于其 C 级检修周期的灵敏度详细推导过程如下。

由于:

$$\frac{\partial \left[\int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \right]}{\partial T_k} = \frac{\partial \left[\int_{B_k^{(i)} T_k}^{(1+B_k^{(i)}) T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(t) dt \right]}{\partial T_k} = A_k^{(i)} \{ (1+B_k^{(i)}) \lambda_k[(1+B_k^{(i)}) T_k] - B_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k) \} \quad (16)$$

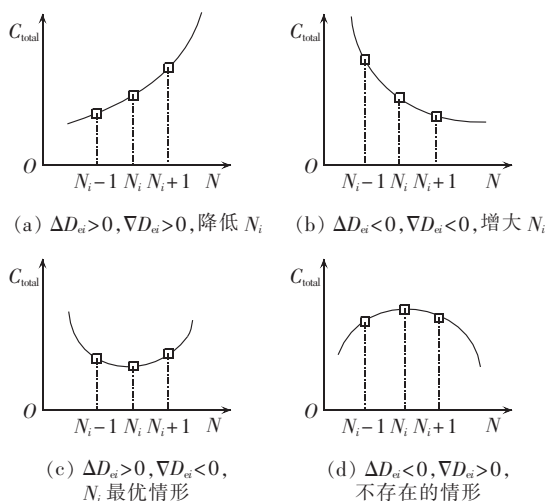


图 3 各情形下 A/C 级检修周期比率的调整方向判别

Fig.3 Adjustment direction of A/C-level maintenance cycle ratio for different situations

所以:

$$\frac{\partial P(S_k)}{\partial T_k} = (2S_k - 1) \times \left[\frac{r_{pAk}'' + (N_k - 1)r_{pCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt}{N_k T_k} \right] / \partial T_k =$$

$$(2S_k - 1) \left\{ \frac{r_k}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} A_k^{(i)} \{ (1 + B_k^{(i)}) \lambda_k[(1 + B_k^{(i)}) T_k] - B_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k) \} - \frac{1}{N_k T_k^2} \left[r_{pAk}'' + (N_k - 1)r_{pCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \right] \right\} \quad (17)$$

由于元件状态相互独立,则元件 i 的事后检修费用和计划检修费用只与元件 i 的计划检修周期有关,而与元件 $j(i \neq j)$ 的计划检修周期无关,则可得式(18):

$$\begin{cases} \frac{\partial N_{pAk}}{\partial T_k} = -\frac{8760}{N_k T_k^2} \\ \frac{\partial N_{pCk}}{\partial T_k} = -\frac{8760(N_k - 1)}{N_k T_k^2} \\ \frac{\partial N_{Ck}}{\partial T_k} = \frac{8760}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} A_k^{(i)} \{ (1 + B_k^{(i)}) \lambda_k[(1 + B_k^{(i)}) T_k] - B_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k) \} - \frac{8760}{N_k T_k^2} \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \\ \frac{\partial N_{pAk}}{\partial T_k} = 0, \frac{\partial N_{pCk}}{\partial T_k} = 0, \frac{\partial N_{Ck}}{\partial T_k} = 0 \quad i \neq k \end{cases} \quad (18)$$

$\partial N_{Ck} / \partial T_k$ 的详细推导过程如下。

由于:

$$N_{Ck} = \frac{8760}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \quad (19)$$

与式(16)推导过程相同,可得:

$$\frac{\partial N_{Ck}}{\partial T_k} = \frac{8760}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} \{ A_k^{(i)} \{ (1 + B_k^{(i)}) \lambda_k[(1 + B_k^{(i)}) T_k] - B_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k) \} \} - \frac{8760}{N_k T_k^2} \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \quad (20)$$

则系统停电成本对 C 级检修周期的灵敏度:

$$\frac{\partial C_{\text{loss}}}{\partial T_k} = C_L \frac{\partial \delta_{\text{EENS}}}{\partial T_k} =$$

$$8760 C_L \sum_{x \in X} \left\{ I_f(x) L_C(x) P(x) \frac{2S_k - 1}{P(S_k)} \times \left[\frac{r_k}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} A_k^{(i)} \{ (1 + B_k^{(i)}) \lambda_k[(1 + B_k^{(i)}) T_k] - B_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k) \} - \frac{1}{N_k T_k^2} \left[r_{pAk}'' + (N_k - 1)r_{pCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \right] \right] \right\} \quad (21)$$

系统计划检修成本对 C 级检修周期的灵敏度:

$$\frac{\partial C_{\text{plan}}}{\partial T_k} = -8760 \left[\frac{C_{pAk}}{N_k T_k^2} + \frac{(N_k - 1)C_{pCk}}{N_k T_k^2} \right] \quad (22)$$

系统事后检修成本对 C 级检修周期灵敏度:

$$\frac{\partial C_{\text{cor}}}{\partial T_k} = C_{Ck} \frac{\partial N_{Ck}}{\partial T_k} = \frac{8760 C_{Ck}}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} A_k^{(i)} \{ (1 + B_k^{(i)}) \lambda_k[(1 + B_k^{(i)}) T_k] - B_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k) \} - \frac{8760 C_{Ck}}{N_k T_k^2} \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \quad (23)$$

则系统总成本对 C 级检修周期的灵敏度:

$$\frac{\partial C_{\text{total}}}{\partial T_k} = \frac{\partial C_{\text{loss}}}{\partial T_k} + \frac{\partial C_{\text{plan}}}{\partial T_k} + \frac{\partial C_{\text{cor}}}{\partial T_k} =$$

$$8760 C_L \sum_{x \in X} \left\{ I_f(x) L_C(x) P(x) \frac{2S_k - 1}{P(S_k)} \times \left[\frac{r_k}{N_k T_k} \sum_{i=1}^{N_k} A_k^{(i)} \{ (1 + B_k^{(i)}) \lambda_k[(1 + B_k^{(i)}) T_k] - B_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k) \} - \frac{1}{N_k T_k^2} \left[r_{pAk}'' + (N_k - 1)r_{pCk}'' + r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt \right] \right] \right\} -$$

$$8760 \left[\frac{C_{pAk}}{N_k T_k^2} + \frac{C_{pCk}(N_k - 1)}{N_k T_k^2} \right] - \frac{8760 C_{Ck}}{N_k T_k^2} \times \sum_{i=1}^{N_k} \int_0^{T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k + t) dt + \frac{8760 C_{Ck}}{N_k T_k} \times \sum_{i=1}^{N_k} A_k^{(i)} \{ (1 + B_k^{(i)}) \lambda_k[(1 + B_k^{(i)}) T_k] - B_k^{(i)} \lambda_k(B_k^{(i)} T_k) \} \quad (24)$$

4.3 计及多级检修的差分公式

定义 $\Delta^{(k)} F(N_1, N_2, \dots, N_M)$ 、 $\nabla^{(k)} F(N_1, N_2, \dots, N_M)$ 分别表示对 $F(N_1, N_2, \dots, N_M)$ 关于元件 k 的 A/C 级检修周期比率 N_k 进行前向差分、后向差分计算。

元件 k 状态概率 $P(S_k)$ 相对于其 A/C 级检修周期比率 N_k 的前向差分、后向差分公式见式(25)、(26)。

$$\Delta^{(k)} P(S_k) = \frac{2S_k - 1}{N_k(N_k + 1)T} \left[-r_{pAk}'' + r_{pCk}'' + N_k r_k \int_{B_k^{N_k+1} T_k}^{1+B_k^{N_k+1} T_k} A_k^{(N_k+1)} \lambda_k(t) dt - r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_{B_k^i T_k}^{(1+B_k^i) T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(t) dt \right] \quad (25)$$

$$\nabla^{(k)} P(S_k) = \frac{2S_k - 1}{N_k(N_k - 1)T} \left[-r_{pAk}'' + r_{pCk}'' + N_k r_k \int_{B_k^{N_k} T_k}^{(1+B_k^{N_k}) T_k} A_k^{(N_k)} \lambda_k(t) dt - r_k \sum_{i=1}^{N_k} \int_{B_k^i T_k}^{(1+B_k^i) T_k} A_k^{(i)} \lambda_k(t) dt \right] \quad (26)$$

由此可推得停电成本 C_{loss} 前向差分、后向差分公式如式(27)、(28)所示。

$$\Delta^{(k)}C_{\text{loss}}=C_L\Delta^{(k)}\delta_{\text{EENS}}=8760C_L\sum_{x\in X}\left[\Delta^{(k)}I_f(x)(L_C(x)P(x))+I_f(x)\Delta^{(k)}(L_C(x)P(x))\right]=8760C_L\sum_{x\in X}\left\{I_f(x)L_C(x)\times P(x)\frac{2S_k-1}{P(S_k)}\frac{1}{N_k(N_k+1)T_k}\left[-r''_{\text{pAk}}+r''_{\text{pCk}}+N_kr_k\times\int_{B_k^{(N_k+1)}T_k}^{(1+B_k^{(N_k+1)})T_k}A_k^{(N_k+1)}\lambda_k(t)dt-r_k\sum_{i=1}^{N_k}\int_{B_k^{(i)}T_k}^{(1+B_k^{(i)})T_k}A_k^{(i)}\lambda_k(t)dt\right]\right\}\quad(27)$$

$$\nabla^{(k)}C_{\text{loss}}=C_L\nabla^{(k)}\delta_{\text{EENS}}=8760C_L\sum_{x\in X}\left\{I_f(x)L_C(x)\times P(x)\frac{2S_k-1}{P(S_k)}\frac{1}{N_k(N_k-1)T_k}\left[-r''_{\text{pAk}}+r''_{\text{pCk}}+N_kr_k\times\int_{B_k^{(N_k)}T_k}^{(1+B_k^{(N_k)})T_k}A_k^{(N_k)}\lambda_k(t)dt-r_k\sum_{i=1}^{N_k}\int_{B_k^{(i)}T_k}^{(1+B_k^{(i)})T_k}A_k^{(i)}\lambda_k(t)dt\right]\right\}\quad(28)$$

计划检修成本 C_{plan} 前向差分、后向差分公式:

$$\Delta^{(k)}C_{\text{plan}}=-8760\frac{C_{\text{pAk}}-C_{\text{pCk}}}{N_k(N_k+1)T_k}\quad(29)$$

$$\nabla^{(k)}C_{\text{plan}}=-8760\frac{C_{\text{pAk}}-C_{\text{pCk}}}{N_k(N_k-1)T_k}\quad(30)$$

事后检修成本 C_{cor} 前向差分、后向差分公式:

$$\Delta^{(k)}C_{\text{cor}}=C_{\text{Ck}}\Delta^{(k)}N_{\text{Ck}}=\frac{8760C_{\text{Ck}}}{N_k(N_k+1)T_k}\left[N_k\int_0^{T_k}A_k^{(N_k+1)}\lambda_k(B_k^{(N_k+1)}T_k+t)dt-\sum_{i=1}^{N_k}\int_0^{T_k}A_k^{(i)}\lambda_k(B_k^{(i)}T_k+t)dt\right]\quad(31)$$

$$\nabla^{(k)}C_{\text{cor}}=C_{\text{Ck}}\nabla^{(k)}N_{\text{Ck}}=\frac{8760C_{\text{Ck}}}{N_k(N_k-1)T_k}\left[N_k\int_0^{T_k}A_k^{(N_k)}\lambda_k(B_k^{(N_k)}T_k+t)dt-\sum_{i=1}^{N_k}\int_0^{T_k}A_k^{(i)}\lambda_k(B_k^{(i)}T_k+t)dt\right]\quad(32)$$

则系统总成本 C_{total} 前向差分、后向差分公式如式(33)、(34)所示。

$$\Delta^{(k)}C_{\text{total}}=\Delta^{(k)}C_{\text{loss}}+\Delta^{(k)}C_{\text{plan}}+\Delta^{(k)}C_{\text{cor}}=8760C_L\sum_{x\in X}\left\{I_f(x)L_C(x)P(x)\frac{2S_k-1}{P(S_k)}\frac{1}{N_k(N_k+1)T_k}\times\left[-r''_{\text{pAk}}+r''_{\text{pCk}}+N_kr_k\int_{B_k^{(N_k+1)}T_k}^{(1+B_k^{(N_k+1)})T_k}A_k^{(N_k+1)}\lambda_k(t)dt-r_k\sum_{i=1}^{N_k}\int_{B_k^{(i)}T_k}^{(1+B_k^{(i)})T_k}A_k^{(i)}\lambda_k(t)dt\right]\right\}-8760\frac{C_{\text{pAk}}-C_{\text{pCk}}}{N_k(N_k+1)T_k}+\frac{8760C_{\text{Ck}}}{N_k(N_k+1)T_k}\left[N_k\int_0^{T_k}A_k^{(N_k+1)}\lambda_k(B_k^{(N_k+1)}T_k+t)dt-\sum_{i=1}^{N_k}\int_0^{T_k}A_k^{(i)}\lambda_k(B_k^{(i)}T_k+t)dt\right]\quad(33)$$

$$\nabla^{(k)}C_{\text{total}}=\nabla^{(k)}C_{\text{loss}}+\nabla^{(k)}C_{\text{plan}}+\nabla^{(k)}C_{\text{cor}}=8760C_L\sum_{x\in X}\left\{I_f(x)L_C(x)P(x)\frac{2S_k-1}{P(S_k)}\frac{1}{N_k(N_k-1)T_k}\times\left[-r''_{\text{pAk}}+r''_{\text{pCk}}+N_kr_k\int_{B_k^{(N_k)}T_k}^{(1+B_k^{(N_k)})T_k}A_k^{(N_k)}\lambda_k(t)dt-\sum_{i=1}^{N_k}\int_0^{T_k}A_k^{(i)}\lambda_k(B_k^{(i)}T_k+t)dt\right]\right\}-8760\frac{C_{\text{pAk}}-C_{\text{pCk}}}{N_k(N_k-1)T_k}+\frac{8760C_{\text{Ck}}}{N_k(N_k-1)T_k}\left[N_k\int_0^{T_k}A_k^{(N_k)}\lambda_k(B_k^{(N_k)}T_k+t)dt-\sum_{i=1}^{N_k}\int_0^{T_k}A_k^{(i)}\lambda_k(B_k^{(i)}T_k+t)dt\right]\quad(34)$$

$$r_k\sum_{i=1}^{N_k}\int_{B_k^{(i)}T_k}^{(1+B_k^{(i)})T_k}A_k^{(i)}\lambda_k(t)dt\right]\}-8760\frac{C_{\text{pAk}}-C_{\text{pCk}}}{N_k(N_k-1)T_k}+\frac{8760C_{\text{Ck}}}{N_k(N_k-1)T_k}\left[N_k\int_0^{T_k}A_k^{(N_k)}\lambda_k(B_k^{(N_k)}T_k+t)dt-\sum_{i=1}^{N_k}\int_0^{T_k}A_k^{(i)}\lambda_k(B_k^{(i)}T_k+t)dt\right]\quad(34)$$

4.4 基于灵敏度和差分思想的电网多级计划检修优化启发式迭代算法

以系统停电损失和检修成本之和最小为目标,基于系统总成本相对于 C 级检修周期的灵敏度分析及系统总成本相对于 A/C 级检修周期比率 N 的前向差分和后向差分指标,对系统各设备的 A/C 级检修周期进行启发式协调优化。具体算法流程如下。

a. 采用状态枚举法枚举电力系统故障状态,并基于直流潮流最优削负荷模型^[20],计算各枚举状态下的系统最小削负荷量,若削负荷量大于 0,则记录该系统状态及对应的削负荷量,最终得到一组系统故障状态($X_1, X_2, \dots, X_m$)以及对应的削负荷量($L_{c1}, L_{c2}, \dots, L_{cm}$),其中 m 为枚举到的故障状态数。

b. 输入系统中各设备故障率模型参数和各设备修复时间、初始 C 级检修周期($T_1, T_2, \dots, T_M$)和 A/C 级检修周期比率($N_1, N_2, \dots, N_M$),其中 M 为电力系统元件数目。

c. 根据元件故障率函数和 C 级检修周期、A/C 级检修周期比率,按式(5)求取各元件平均无效度,结合步骤 **a** 得到的 m 个削负荷状态及对应削负荷量,按式(7)、(8)求得系统可靠性指标 $\delta_{\text{LOLP}}, \delta_{\text{EENS}}$,按式(9)计算系统停电成本,按式(11)~(15)计算 A、C 级计划检修成本、事后检修成本及系统总成本。

d. 按式(24)计算系统总成本相对于各元件 C 级计划检修周期的灵敏度 $\beta_{\text{se}}=(\beta_{\text{se1}}, \beta_{\text{se2}}, \dots, \beta_{\text{seM}})$ 。

e. 若所有元件的灵敏度绝对值都不大于预设门限值 k_{esp} ,则转入步骤 **f**。否则选出 β_{se} 中最大和最小值所对应的元件序号分别计为 h_1, l_1 ,做如下处理:若满足灵敏度 $\beta_{\text{se}h_1} > k_{\text{esp}}$,令 $T_{h_1}=0.99T_{h_1}$;若 $\beta_{\text{se}l_1} < -k_{\text{esp}}$,令 $T_{l_1}=1.01T_{l_1}$,转入步骤 **c**。

f. 按式(30)、(31)计算系统总成本相对于各元件 A/C 级检修周期比率 N 的前向差分 $\Delta D_e=(\Delta D_{e1}, \Delta D_{e2}, \dots, \Delta D_{eM})$ 和后向差分 $\nabla D_e=(\nabla D_{e1}, \nabla D_{e2}, \dots, \nabla D_{eM})$ 。设 $S_{\text{DE}}=\Delta D_e \cdot \nabla D_e$,其中“ $\cdot$ ”表示进行点乘运算。若满足 S_{DE} 中所有元素都小于 0,则迭代算法结束。否则,做如下处理:找出 S_{DE} 中大于 0 的元素对应的元件序号集合记为向量 p ,寻找 $\Delta D_e(p)$ 中最小值和 $\nabla D_e(p)$ 最大值对应元件序号,分别计为 l_2, h_2 。若 $\Delta D_{el_2} < 0$,则令 $N_{l_2}=N_{l_2}+1$;若 $\nabla D_{eh_2} > 0$,则令 $N_{h_2}=N_{h_2}-1$ 。处理完毕后转步骤 **c**。A/C 级计划检修协调优化程序流程图如图 4 所示。

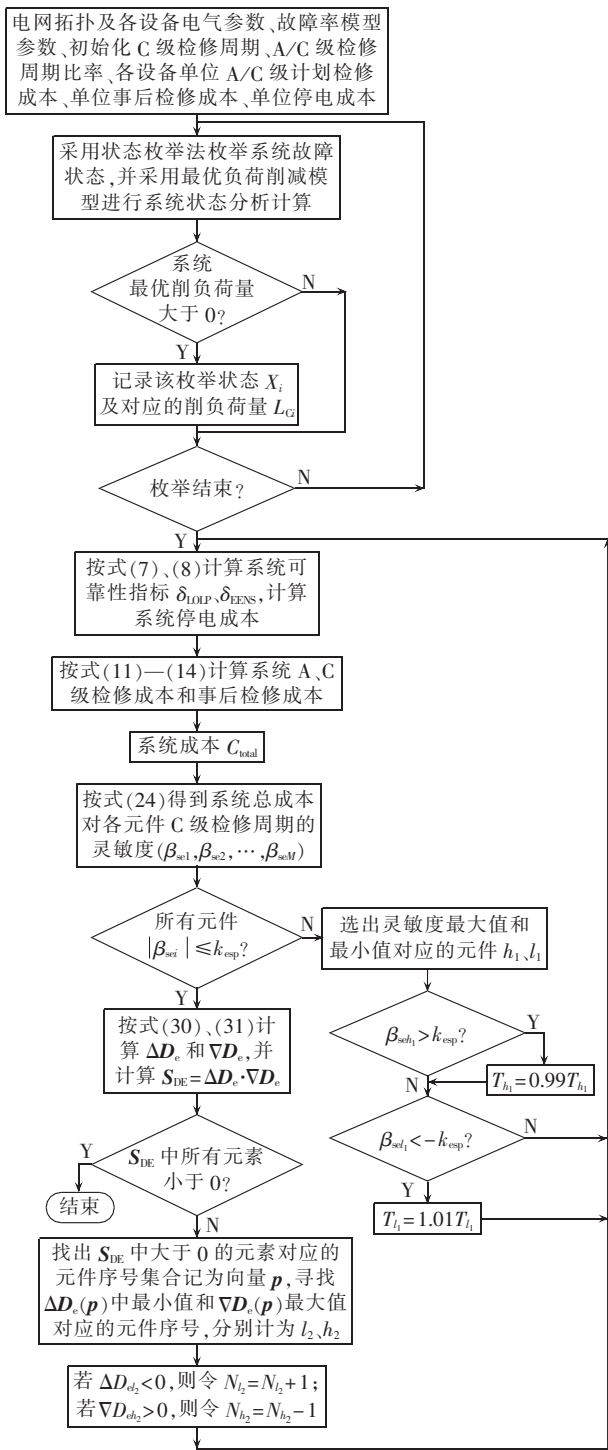


图 4 A/C 级计划检修协调优化程序流程图

Fig.4 Flowchart of coordination and optimization of A/C-level preventive maintenance

5 算例分析

本文针对 RBTS、IEEE-RTS79 系统开展 A/C 级计划检修优化研究。

5.1 参数设置

设发电机 C 级检修材料费用与其类型和容量有关,如表 1 所示^①。输电线路进行 1 次 C 级检修的材料费设为 0.1 万元/km。同时设 α_1 、 α_2 分别取原有故障

率的 60%和 30%数值, β_2 取值为 3。设施工费 $C_w=0.012$ 万元/h,单位停电成本 $C_L=0.05$ 万元/(MW·h),事后检修材料费取为 C 级检修材料费的 1/3,A 级检修材料费取为 C 级检修材料费的 2.5 倍。设 C 级检修的故障率恢复因子、役龄回退因子分别为 $a^{(i)}=1+i/(8i+6)$, $b^{(i)}=i/(8i+6)$ 。

表 1 火/水电机组 C 级检修材料费参考标准

Table 1 Material cost reference of C-level maintenance for thermal/hydro generation units

机组	容量/MW	材料费/(元·kW ⁻¹)
火电机组	$P_N < 100$	12.0
	$100 \leq P_N < 300$	10.0
	$300 \leq P_N < 600$	7.0
	$600 \leq P_N < 1000$	6.6
水电机组	$P_N < 20$	8.0
	$20 \leq P_N < 50$	5.0
	$50 \leq P_N < 100$	4.5
	$100 \leq P_N < 200$	3.3

5.2 计划检修优化结果

5.2.1 RBTS 系统计划检修优化

RBTS 系统拓扑图如图 5 所示,其发电机位置如表 2 所示。

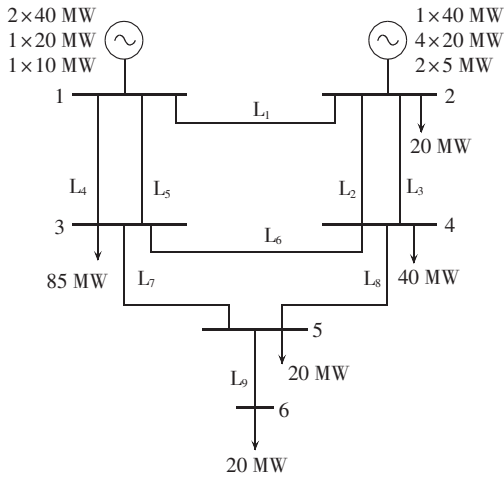


图 5 RBTS 系统拓扑图

Fig.5 Topology of RBTS system

表 2 RBTS 发电机位置

Table 2 Generating unit locations of RBTS

发电机	对应节点	发电机容量/MW	发电机	对应节点	发电机容量/MW
G ₁	1	40	G ₇	2	20
G ₂	1	10	G ₈	2	20
G ₃	1	20	G ₉	2	20
G ₄	1	40	G ₁₀	2	20
G ₅	2	5	G ₁₁	2	40
G ₆	2	5			

首先定义 2 种检修方式:方式 I 为传统 A/C 级检修模式,即每年进行 1 次 C 级检修,5 a 进行 1 次

① 中国华电集团公司安全生产部.中国华电生[2007]1653 号.中国华电集团公司检修费、材料费限额标准,2007.

A 级检修;方式 II 为以检修成本和停电成本之和最小的 A/C 级优化检修方式。假设 RBTS 系统^[21]发电机 A 和 C 级检修时间分别为事后检修时间的 1.2 倍和 1.0 倍,输电线路的 A/C 级检修时间为事后检修时间的 1.5 倍/1.2 倍。计划检修优化结果如表 3、图 6—9 所示。

从图 6—9、表 3 可以得到以下几点结论。

a. 从表 3 可以看出,方式 II 相对方式 I 总成本有所降低,而系统可靠性水平则大幅提升。其主要原因是方式 II 下合理调整了 A、C 级计划检修成本,特别是 A 级检修成本的增加,显著提高了系统可靠性,事后检修成本和停电成本大幅降低,系统可靠性收益的增加大于计划检修成本的增大,使得系统总成本降低。

b. 从图 6、7 可看出,除少数发电机、输电线路外,检修优化后各元件 C 级检修周期有所延长,A/C 级检修周期比率则有所降低;从图 8、9 可看出,C 级检修成本普遍降低,除线路 L₄—L₈ 外,A 级检修成本均有所增加。表明 RBTS 系统计划检修优化后更侧重于 A 级检修,以获得更大的检修效益。其中 L₄、L₅ 本身可靠性较高,而 L₆—L₈ 除本身可靠性较高外,其停运对系统充裕度影响也较小,因而 L₄—L₈ 都降低了 A 级检修投入,以节约检修成本。

c. 图 8、9 中部分设备(如 G₁、G₃、G₄)C 级检修周期缩短,而 C 级检修成本反而降低,原因在于 C 级检修成本由 C 级检修周期和 A/C 级检修周期比率 N 共同决定(如式(12)所示),虽然 C 级检修周期变短,但 N 降低导致平均每年分摊到的 C 级检修成本减少。

d. 不同类型、容量和可靠性的电力设备对电网充裕度影响程度不同,优化后其最优 C 级检修周期和 A/C 级检修周期比率也不同,相应的 A/C 级计划检修投入也不一样。方式 II 根据电力设备对电网充裕度贡献的大小对其 A/C 级检修周期进行了优化调整,加大了对电网充裕度贡献大的设备计划检修投入。如 G₁、G₄ 为系统内大机组,其停运与否显著影响系统电源充裕度,因而优化后缩短了其 A、C 级检修周期,以换取更优的可靠性收益。

e. 即使是完全相同的设备,其所在电网拓扑中位置不同,最优 C 级检修周期和 A/C 级检修周期比率也不一致,原因在于最优负荷削减模型中计入了网络拓扑信息,不同位置元件停运对电网充裕度影响不一致,优化将加大对系统内处于重要拓扑位置的设备计划检修投入。如线路 L₆—L₉ 具有相同的电气和可靠性参数,但由于 L₉ 为负荷节点 6 单供线路,其停运直接导致节点 6 停电,因而优化后 L₉ 的 C 级

表 3 RBTS 系统优化前后系统可靠性和系统各成本对比
Table 3 Comparison of system reliability and costs between before and after optimization for RBTS system

方式	δ_{LOLP}	$\delta_{EENS}/(\text{MW}\cdot\text{h})$	$C_{\text{total}}/\text{万元}$	$C_{\text{loss}}/\text{万元}$	$C_{\text{out}}/\text{万元}$	$C_{\text{plan}}/\text{万元}$	$C_{\text{A plan}}/\text{万元}$	$C_{\text{C plan}}/\text{万元}$
I	0.02025	2721.46	904.30	136.07	425.65	342.57	130.91	211.66
II	0.01733	2319.90	870.74	115.99	289.50	365.25	178.77	186.48

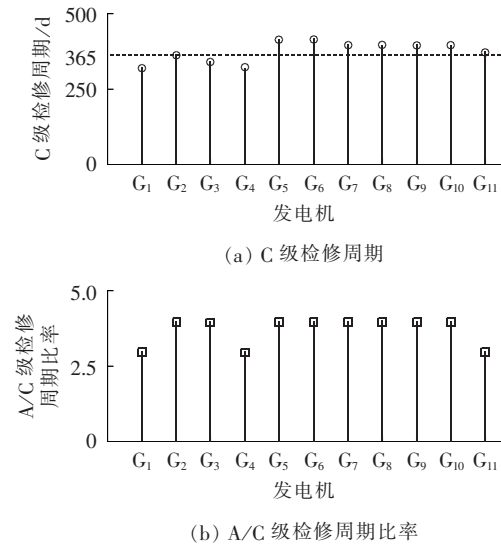


图 6 发电机优化后 C 级的检修周期及 A/C 级检修周期比率

Fig.6 C-level maintenance cycle and A/C-level maintenance cycle ratio after generator optimization

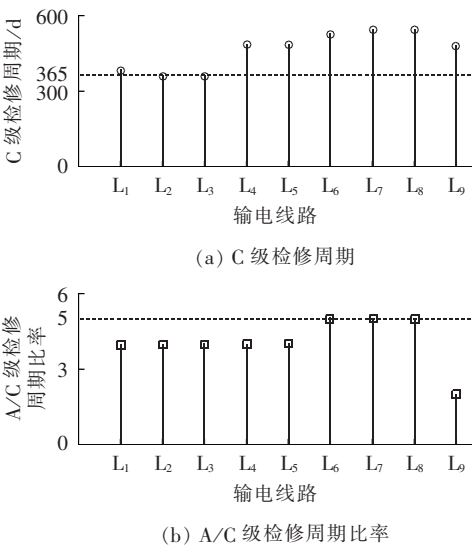


图 7 输电线路优化后 C 级的检修周期及 A/C 级检修周期比率

Fig.7 C-level maintenance cycle and A/C-level maintenance cycle ratio after transmission line optimization

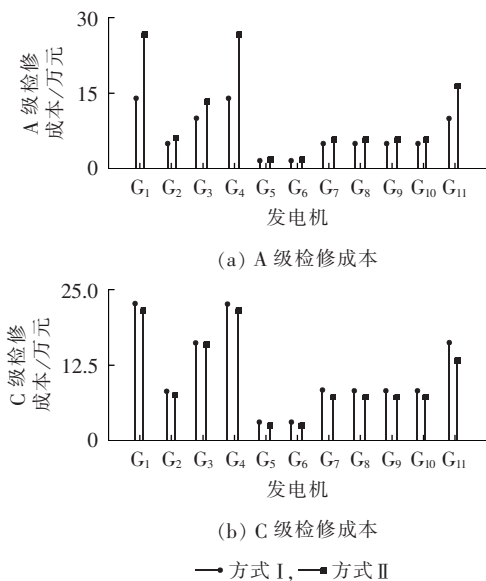


图 8 发电机优化后 A/C 级的检修成本

Fig.8 A/C-level maintenance cost after generator optimization

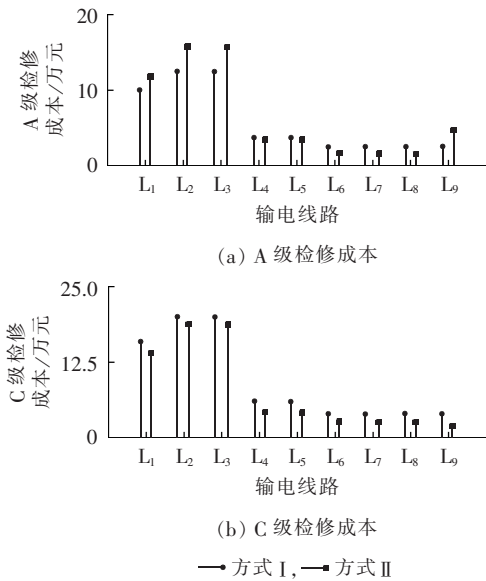


图 9 输电线路优化后 A/C 级的检修成本

Fig.9 A/C-level maintenance cost after transmission line optimization

检修周期和 A/C 级检修周期比率较 L_6 — L_8 显著降低以提高其可靠性,降低失负荷风险。

5.2.2 IEEE-RTS79 系统计划检修优化

IEEE-RTS79 系统拓扑图如图 10 所示,其发电机位置如表 4 所示。

设 IEEE-RTS79 系统^[22]发电机的 A/C 级检修时间为事后检修时间的 1.6 倍/1.4 倍,输电线路的 A/C

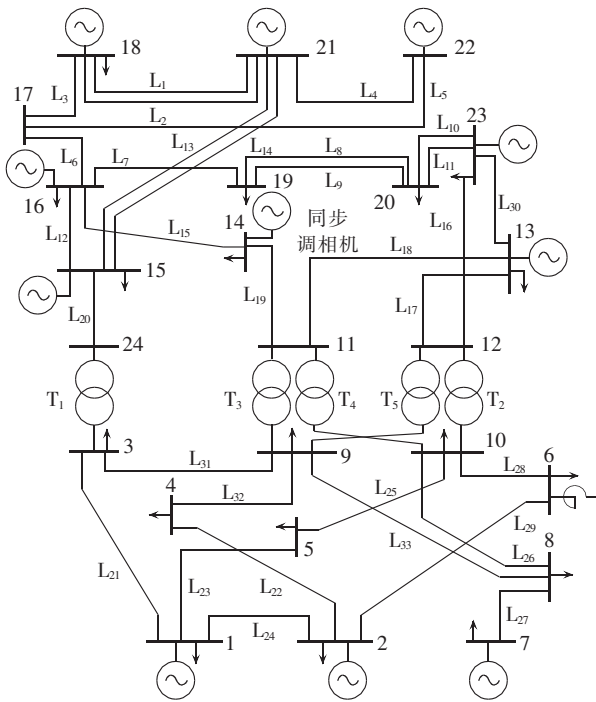


图 10 IEEE-RTS79 系统拓扑图

Fig.10 Topology of IEEE-RTS79 system

表 4 IEEE-RTS79 系统发电机位置

Table 4 Generating unit locations of IEEE-RTS79 system

发电机	对应节点	发电机容量/MW	发电机	对应节点	发电机容量/MW
G ₁	18	400	G ₁₇	7	100
G ₂	21	400	G ₁₈	13	197
G ₃	22	50	G ₁₉	13	197
G ₄	16	155	G ₂₀	15	12
G ₅	23	155	G ₂₁	15	12
G ₆	13	197	G ₂₂	15	12
G ₇	15	12	G ₂₃	15	12
G ₈	1	20	G ₂₄	15	155
G ₉	2	76	G ₂₅	22	50
G ₁₀	7	100	G ₂₆	22	50
G ₁₁	1	20	G ₂₇	22	50
G ₁₂	1	76	G ₂₈	22	50
G ₁₃	1	76	G ₂₉	22	50
G ₁₄	2	20	G ₃₀	23	155
G ₁₅	2	20	G ₃₁	23	350
G ₁₆	2	76	G ₃₂	7	100

级检修时间为事后检修时间的 1.2 倍/1.0 倍,变压器 A/C 级检修时间为事后检修时间的 80%/60%,其他假设和方式 I、II 定义与 RBTS 系统相同。

从表 5 和图 11—13 可以得到以下结论。

a. 从表 5 可见,IEEE-RTS79 系统计划检修优化后,系统总成本显著降低,降幅达 13.34%;可靠性显

表 5 IEEE-RTS79 系统优化前后系统可靠性和系统各成本对比

Table 5 Comparison of system reliability and costs before and after optimization for IEEE-RTS79 system

方式	δ_{LOLP}	$\delta_{EENS}/(MW \cdot h)$	$C_{total}/\text{万元}$	$C_{loss}/\text{万元}$	$C_{cur}/\text{万元}$	$C_{plan}/\text{万元}$	$C_{plan}^A/\text{万元}$	$C_{plan}^C/\text{万元}$
I	0.1281	193516.96	23394.73	9675.85	8800.95	4917.94	1885.05	3032.88
II	0.0942	134497.14	20273.33	6724.86	7186.75	6361.72	3629.25	2732.48

著提高,其中 δ_{EENS} 减少 59 019.82 MW·h,减少停电成本达 2 950.99 万元。其原因在于优化后合理调整了 A/C 级检修成本,特别是大幅增加了 A 级检修投入,使得系统可靠性显著提高,从而系统事后检修成本、系统停电成本显著降低。

b. 从图 11—13 可以看出,IEEE-RTS79 系统经过计划检修优化后,发电系统大部分发电机 C 级检修周期有所缩短,A/C 级检修周期比率普遍降低,尤其是对电源充裕度影响较大的系统内大容量机组 G_1 、 G_2 、 G_{31} 表现最为显著,其 A/C 级检修交替进行;而输电系统中变压器和输电线路 C 级检修周期均有较大幅度的增大,除少数线路外 A/C 级检修比率保持不变或有所增加。原因在于 IEEE-RTS79 输电系

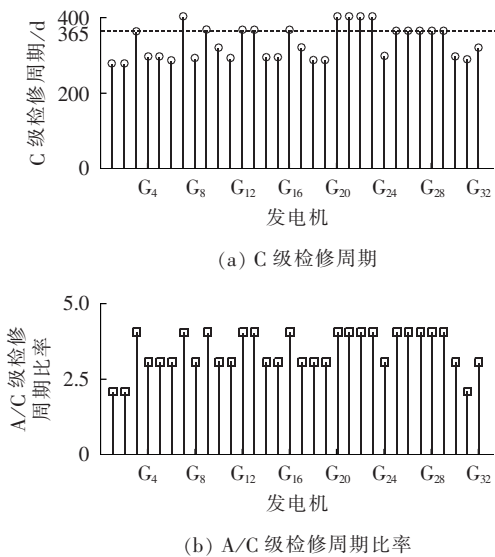


图 11 发电机 C 级检修周期及 A/C 级检修周期比率
Fig.11 C-level maintenance cycle and A/C-level maintenance cycle ratio of generators

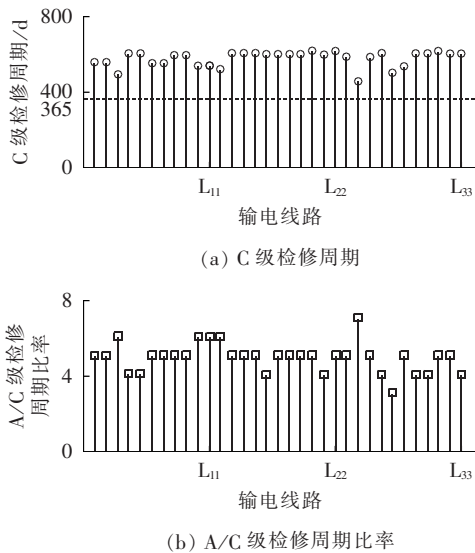


图 12 输电线路 C 级检修周期及 A/C 级检修周期比率
Fig.12 C-level maintenance cycle and A/C-level maintenance cycle ratio of transmission lines

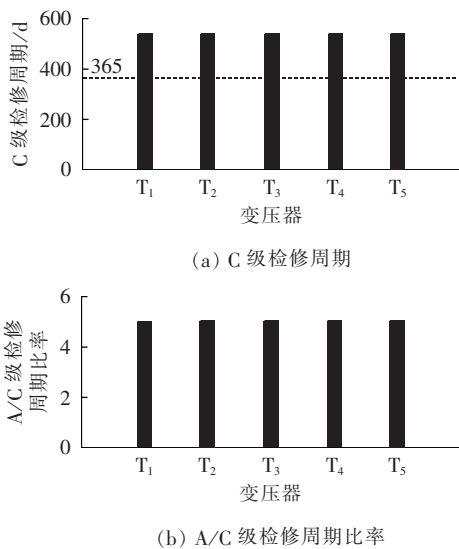


图 13 变压器 C 级检修周期和 A/C 级检修周期比率
Fig.13 C-level maintenance cycle and A/C-level maintenance cycle ratio of transformers

统强大,少数输电元件故障对系统充裕度影响微小,且输电设备自身可靠性较高,因而优化后重点增加对系统充裕度影响较大的发电系统的计划检修投入以获得较高的可靠性收益。

5.3 恢复因子变化对多级计划检修优化的影响规律

故障率恢复因子 $a^{(i)}$ 和役龄回退因子 $b^{(i)}$ 反映了电力设备进行第 i 次 C 级计划检修后的可靠性恢复效果,这里将 $(a^{(i)}, b^{(i)})$ 统称为恢复因子。恢复因子越大,表明计划检修后元件可靠性恢复效果越差。本节通过逐步增大恢复因子,探索其对电网计划检修优化的影响规律。图 14—16 为恢复因子从初始值增大到初始值的 1.8 倍时,RBTS 发电系统 A/C 级检修周期变化规律。

从图 14—16 看出,随着恢复因子的提高,优化后各发电机组 C 级检修周期大致呈增大趋势,而 A 级检修周期呈减小趋势,A/C 级检修周期比率逐渐减小。原因在于,恢复因子越高,表明 C 级计划检修效率降低,故延长 C 级计划检修时间、减少 C 级检修次数以节约检修成本,而把资源投入到更有效的 A 级计划检修中,以获得最优的检修效益。此外,图

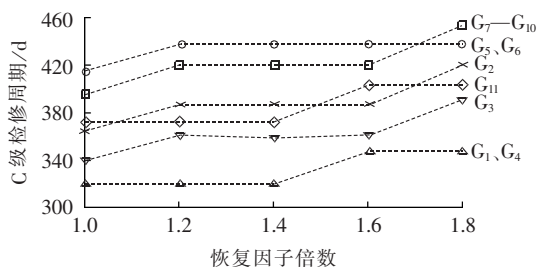


图 14 各发电机 C 级检修周期随恢复因子倍数变化规律
Fig.14 Relationship between C-level maintenance cycle and recovery factor for different generators

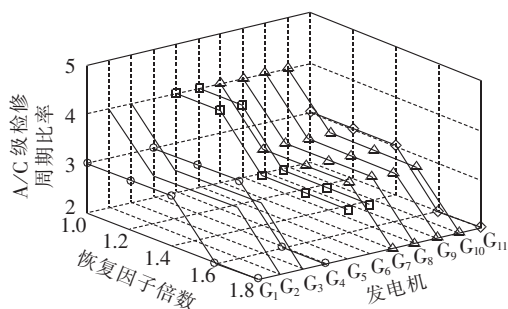


图 15 各发电机 A/C 级检修周期比率随恢复因子倍数变化规律

Fig.15 Relationship between A/C-level maintenance cycle ratio and recovery factor for different generators

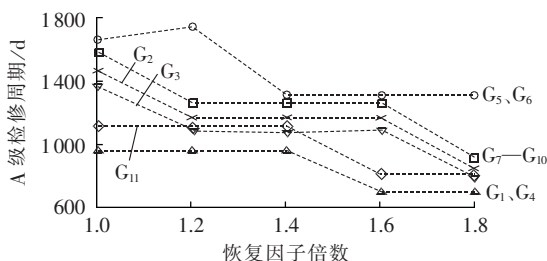


图 16 各发电机 A 级检修周期随恢复因子倍数变化规律

Fig.16 Relationship between A-level maintenance cycle and recovery factor for different generators

16 中 G_5 、 G_6 在恢复因子增大到 1.2 倍时 A 级检修周期相对于 1.0 倍时增大,原因在于 G_5 、 G_6 属于系统内最小容量机组,其停运与否对系统充裕度影响微小,在恢复因子处于 1.0~1.2 时,其对系统总成本影响的主导因素是机组本身的检修成本的变化,因而延长了其 A/C 级计划检修周期,以节约检修成本。

6 结论

本文计及电力设备故障率的时间增长效益,基于故障率函数和有效役龄建立了电力设备多级计划检修模型;建立了系统可靠性/经济性指标关于 C 级计划检修周期和 A/C 级检修周期比率的解析表达式;提出了融合灵敏度和差分思想的电网 A/C 级计划检修优化启发式迭代算法;通过 RBTS、IEEE-RTS79 系统验证了该算法的有效性,并对比分析了传统计划检修模式,探讨了 C 级检修恢复因子对计划检修优化的影响。分析得出以下结论。

a. 基于灵敏度和差分思想的电网 A/C 级计划检修优化启发式迭代算法充分利用了灵敏度指标指示 C 级计划检修周期(连续型决策变量)最优调整方向,利用前向/后向差分指标指示 A/C 级检修周期比率 N (整数型决策变量)最优调整方向,协调 2 类决策变量进行启发式迭代优化;此外,在整个优化过程只需进行 1 次最优削负荷计算,迭代过程直接通过解析表达式计算 C 级检修周期或 A/C 级检修周期比率调整后的系统可靠性指标,节省了大量计

算时间。因此,该算法具有搜索效率高、计算速度快的特点。

b. 不同类型、容量和可靠性的电力设备对电网充裕度影响程度不同,优化后其最优 C 级检修周期和 A/C 级检修周期比率也不同。即使是相同的设备,其所在电网拓扑中位置不同,由于最优负荷削减模型中计入了网络拓扑信息,最优 C 级检修周期和 A/C 级检修周期比率也不一致,优化将加大对系统内处于重要拓扑位置的设备计划检修投入。

c. 探讨了 C 级检修恢复因子变化对 A/C 级计划检修优化结果的影响规律,结果表明 C 级检修恢复因子越高(C 级检修效率越低),导致优化后更侧重于对元件可靠性恢复更有效的 A 级计划检修投入,以提高计划检修效益。

参考文献:

- [1] CHEN Yi, WANG Zhonglai, QIU Jing, et al. Adaptive bathtub hazard rate curve modeling via transformed radial basis functions[C]// 2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. Xi'an, China: IEEE, 2011: 110-114.
- [2] LI Wenyuan, VAAHEDI E, CHOUDHURY P. Power system equipment aging[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2006, 4(3): 52-58.
- [3] 汲国强, 张伯明, 吴文传, 等. 一种适用于可靠性评估的电网设备时变停运模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 56-63.
- [4] JI Guoqiang, ZHANG boming, WU Wenchuan, et al. A new time-varying component outage model for power system reliability analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 56-63.
- [5] RETTERATH B, VENKATA S S, CHOWDHURY A A. Impact of time-varying failure rates on distribution reliability[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2005, 27(11): 682-688.
- [6] NAKAGAWA T. Optimum policies when preventive maintenance is imperfect[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1979, 28(4): 331-332.
- [7] SYAMSUNDAR A, NAIKAN V N A. Imperfect repair proportional intensity models for maintained systems[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2011, 60(4): 782-786.
- [8] LU Xiaofei, CHEN Maoyin, LIU Min, et al. Optimal imperfect periodic preventive maintenance for systems in time-varying environments[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2009, 58(2): 1-13.
- [9] LIU Yu, HUANG Hongzhong. Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(2): 356-367.
- [10] LUGTIGHEID D, JIANG X, JARDINE A K S. A finite horizon model for repairable systems with repair restrictions[J]. Journal of the Operational Research Society, 2008, 59(10): 1321-1331.
- [11] PAN R, RIGDON S E. Bayes inference for general repairable systems[J]. Journal of Quality Technology, 2009, 41(1): 82-94.
- [12] LIN D, ZUO M J, YAM R C M. General sequential imperfect preventive maintenance models[J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2000, 7(3): 253-266.
- [13] SHEU S H, CHANG C C. A periodic replacement model based

- on cumulative repair-cost limit for a system subjected to shocks [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2010, 59(7): 374-382.
- [13] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T838—2003 发电企业设备检修导则[S]. 北京:中国电力出版社, 2003.
- [14] 国家能源局. DL/T573—2010 电力变压器检修导则[S]. 北京:中国电力出版社, 2010.
- [15] 国家电网公司. Q/GDW 174—2008 架空输电线路状态检修导则[S]. 北京:中国电力出版社, 2008.
- [16] BERTLING L, ALLAN R, ERIKSSON R. A reliability-centered asset maintenance method for assessing the impact of maintenance in power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(1): 75-82.
- [17] RETTERATH B, VENKATA S S, CHOWDHURY A. Impact of time-varying failure rates on distribution reliability[C]//8th International Conference on Probability Method Applied to Power Systems. Ames, Iowa, USA; Iowa States University, 2004: 953-958.
- [18] GERARD L. A failure model for distribution systems[C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting 2004. Denver, USA: Power Engineering Society, 2004: 1836-1840.
- [19] 段东立, 武小悦, 邓宏钟. 基于时变故障率与服务恢复时间模型的配电系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 57-63.
- DUAN Dongli, WU Xiaoyue, DENG Hongzhong. Reliability Evaluation of distribution systems based on time-varying failure rate and service restoration time model[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 57-63.
- [20] 赵渊, 周家启, 刘洋. 发输电组合系统可靠性评估中的最优负荷削减模型分析[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 34-37.
- ZHAO Yuan, ZHOU Jiaqi, LIU Yang. Analysis on optimal load shedding model in reliability evaluation of composite generation and transmission system[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 34-37.
- [21] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, et al. A reliability test system for educational purposes-basic data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.
- [22] SUBCOMMITTEE P M. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(6): 2047-2054.

作者简介:



赵 渊

赵 渊(1974—),男,四川三台人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail: yuanzhao@msn.cn);

张 煦(1986—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划与可靠性(E-mail: zhangxu95@126.com)。

Coordination and optimization of power-grid preventive maintenance cycle in multi-level maintenance mode

ZHAO Yuan, ZHANG Xu, WANG Jie, FAN Fei, GENG Lian

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A model of multi-level maintenance mode for the electric power devices is built based on the effective age and failure rate function, and the coordination and optimization of power-grid preventive maintenance cycle in multi-level maintenance mode is researched from the cost-benefit ratio of generation-transmission system reliability. The failure rate model of electric power device is established for A-level perfect maintenance and C-level imperfect maintenance, which considers the failure rate growing along with the time and follows the preventive maintenance level definitions in the electric power device maintenance guide. The analytical expressions among the system reliability index, system maintenance cost, outage cost, C-level preventive maintenance cycle and A/C-level maintenance cycle ratio are established. A heuristic iterative algorithm based on the combination of sensitivity analysis and forward/backward differential is proposed to solve the large-scale mixed-integer nonlinear planning problem for the coordination and optimization of multi-level preventive maintenance, which takes the minimum sum of system maintenance cost and outage cost as its objective. The impact of maintenance recovery factor on the optimization of system preventive maintenance is discussed. With RBTS and IEEE-RTS79 systems the effectiveness of the proposed algorithm is verified.

Key words: imperfect preventive maintenance; preventive maintenance; maintenance cycle; models; sensitivity; differential; optimization; maintenance; reliability; costs